

보호거리에 따른 전압제한형 SPD의 보호효과에 대한 시뮬레이션기법

(Simulation Method on the Protection Effects of Voltage-Limiting Type SPDs Associated with the Protective Distance)

이복희* · 김유하 · 안창환

(Bok-Hee Lee · You-Ha Kim · Chang-Hwan Ahn)

Abstract

This paper presents a method of simulating the protection effects of surge protective devices (SPDs) depending on the protective distance and types of input impedance of load to be protected. In order to analyze the protective performances of voltage-limiting type SPDs associated with the reflection and oscillation phenomena, the terminal voltage across load being protected and the residual voltage of SPDs were simulated by using EMTP model as functions of the protective distance and types of input impedance of loads. As a consequence, SPDs should be installed by taking into account the protective distance and input impedance of loads to achieve reliable protection of electrical and electronic equipment from lightning and switching surges. It is expected that the simulation method proposed in this paper could be practically used in design for installing SPDs in low-voltage distribution systems.

Key Words : Lightning Surge, Surge Protective Device (SPD), Voltage-Limiting Type SPD, Protective Distance, EMTP Model, Oscillation Phenomenon, Residual Voltage

1. 서 론

최근 초고속 정보통신기술의 눈부신 발전에 따라 고도 정보화 사회로 진전되었으며, 초소형 반도체 소자를 이용한 디지털 전자기기의 임펄스내전압은 낮아져

전원선을 통하여 입사하는 뇌서지 또는 개폐서지로 인한 전자기기의 손상과 기능정지 등으로 신뢰성의 저하와 경제적 피해가 증가하고 있다[1]. 따라서 전기설비판단기준에서 대기현상 또는 개폐로 인한 과전압으로부터 전기설비를 보호하기 위해 과전압범주를 도입하여 건축물 내부에 설치하는 전기전자기기의 정격 임펄스내전압을 규정하고 있으며, 이에 따라 적절한 서지방호장치(surge protective device: SPD)를 설치하도록 권장하고 있다[2,3].

서지로부터 전기전자기기의 효과적인 보호를 위해서는 고성능 SPD, 적절한 제한전압과 에너지내량을

* 주(교신)저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수
* Main(Corresponding) author : School of Electrical Engineering, Inha University, Professor
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2013년 4월 22일
1차심사 : 2013년 4월 30일, 2차심사 : 2013년 5월 15일
심사완료 : 2013년 5월 20일

가지는 SPD의 선정 등도 중요한 요소이지만 보호대상기기와 SPD 사이의 거리인 보호거리와 부하의 입력임피던스 등의 조건에 따른 정확한 보호효과에 대한 검토가 더욱 중요하다[4-7].

최근 전원선을 통하여 입사하는 서지로부터 전기전자기기의 보호를 위한 고성능 SPD를 개발하기 위한 연구는 많이 이루어져 왔으나 SPD의 설치조건에 따른 보호효과 및 SPD의 효과적인 설치기법에 대한 기술의 개발 및 보급은 아직 미흡한 실정이다. 예를 들면 전압제한형 MOV소자를 이용한 SPD에 의해 제한된 서지전압은 근사적으로 급상승의 구형파로 되어 보호거리 및 보호대상기기의 입력임피던스의 유형에 따라 부하 단자전압이 크게 변동하여 전기전자기기의 고장을 초래할 수 있는 것으로 밝혀졌다[8].

실제로 건축물 또는 산업현장에서 서지에 대한 SPD의 보호성능의 분석을 실험에만 의존할 수 없으며, 설계에 활용하기 위해서는 설치조건에 따른 SPD의 보호효과에 대한 시뮬레이션기법의 개발이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 부하 입력임피던스의 유형 및 보호거리에 따른 SPD의 보호효과를 추정할 수 있고, 효과적인 SPD의 설치를 위한 설계에 활용할 수 있는 시뮬레이션기법을 제안하기 위하여 수행한 전압제한형 SPD에 대한 연구결과를 기술하였다. 즉 SPD에 의해 보호되는 입력임피던스가 R, L, C 및 $R-L$ 직렬회로, $R-C$ 병렬회로 등의 전기전자기기에 대하여 보호거리에 따라 보호대상기기의 단자에 나타나는 전압을 EMTP프로그램으로 산출하고, 시뮬레이션기법의 타당성을 검토하였다.

2. 시뮬레이션

전압제한형 MOV소자를 이용한 SPD의 전압제한특성의 시뮬레이션을 위한 등가회로는 제한전압-전류곡선($V-I$ 곡선)의 실측결과를 기반으로 모델링하였으며, 시뮬레이션을 위한 등가모델회로를 그림 1에 나타내었다. 등가모델회로는 조합파발생기, SPD, 보호거리에 상응하는 선로정수와 부하의 입력임피던스로 이루어진다. 개방전압 $1.2/50\mu s$ 임펄스전압과 단락전류 $8/20\mu s$ 의 임펄스전류가 발생하는 조합파발생장치

사용하였으며, SPD와 부하 사이의 보호거리에 대한 배선의 선로정수 및 부하의 입력임피던스의 유형에 따라 최대 연속사용전압 U_c 이 275V인 MOV소자로 이루어진 SPD의 잔류전압과 부하의 단자전압을 전력계통의 과도현상의 해석에 이용되는 ATP-EMTP로 산출하였다.

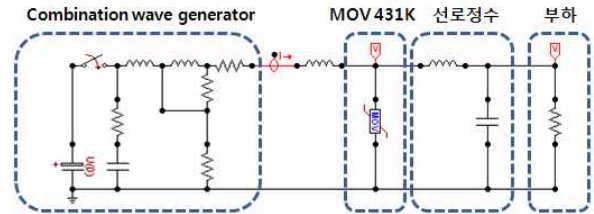


그림 1. SPD의 보호효과에 대한 시뮬레이션을 위한 등가회로모델

Fig. 1. Equivalent circuit model for simulating the protective effects of SPD

보호거리에 상응하는 배선의 회로정수는 실험회로를 기반으로 산출하였으며, 전선의 도체단면적은 2.5mm^2 이고, PVC절연피복의 두께는 0.8mm 이며 비유전율은 4.5를 적용하였다. 이때 2개의 전선이 유전매질(ϵ, μ, σ)에서 거리 D 만큼 이격되어 평행하게 배열되어 있고, 반경 a 인 원형 도체인 경우 다음과 같은 식으로 인덕턴스와 커패시턴스를 산출할 수 있다[9].

$$L = \frac{\mu}{\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{D}{2a}\right) \quad (1)$$

$$C = \frac{\pi\epsilon}{\cosh^{-1}\left(\frac{D}{2a}\right)} \quad (2)$$

도체의 직경 0.8mm 및 선간 이격거리 0.1m 로 배열한 배선의 회로정수는 전선피복의 비유전율을 고려하여 계산하면, 두 도선 간 매질의 비유전율은 약 1로 볼 수 있다. 배선의 커패시턴스 $C=5.96\text{pF/m}$, 인덕턴스 $L=1.88\mu\text{H/m}$ 로 얻어졌으며, 누설컨덕턴스는 무시하였다. 특성임피던스는 $Z=561.5\Omega$ 이고, 진행파의 전파속도는 광속에 상응하는 약 $3 \times 10^8\text{m/s}$ 로 나타났다. SPD의 $V-I$ 곡선은 실측데이터와 제품의 카탈로그에 제시

된 값을 참조하였다. 본 연구에 적용한 $V-I$ 곡선을 그림 2에 나타내었으며, 시뮬레이션조건인 부하의 유형과 입력임피던스를 표 1에 나타내었다.

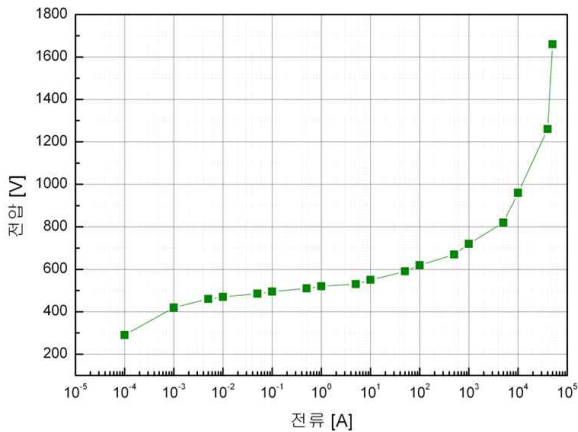


그림 2. 본 연구에 사용한 SPD의 $V-I$ 곡선
Fig. 2. $V-I$ curve of SPD used in this work

표 1. 본 연구에 사용한 부하 유형
Table 1. Types of load used in this work

부하의 유형	입력임피던스
R	10Ω, 100Ω, 10kΩ
L	1μH, 20μH, 160μH
C	1.64nF, 8.2nF, 17nF
$R-L$ 직렬	10Ω - 20μH, 10Ω - 160μH, 10kΩ - 20μH
$R-C$ 병렬	10Ω // 1.64nF, 10Ω // 17nF, 10kΩ // 17nF

3. 결과 및 고찰

3.1 SPD와 부하 단자전압 파형의 특성

뇌방전에 의한 서지전압 및 선로를 개폐할 때 발생하는 급상승의 개폐서지전압은 진행파로서 작용하며, 선로상을 전파하는 진행파는 특성임피던스가 다른 선로의 변이점에 도달하면 그 일부는 반사되고 나머지는 투과되며, 진행파의 반사와 투과는 변이점의 상태에 따라 달라진다[10].

전압제한형 SPD에 1.2/50μs 임펄스전압이 인가된 경

우 부하 입력임피던스의 유형과 크기를 파라미터로 하여 보호거리에 대한 SPD와 부하 단자전압을 산출하기 위한 시뮬레이션을 하였으며, 계산에는 ATP-EMTP 프로그램을 이용하였다. 보호거리 50m 일 때 부하 입력임피던스에 따른 전압제한형 SPD의 잔류전압과 단자전압에 대하여 시뮬레이션한 결과의 대표적인 예를 그림 3에 나타내었다. 1.2/50μs 임펄스전압에 대한 SPD의 잔류전압과 부하 단자전압에 대한 시뮬레이션결과는 문헌 [8]에 제시된 실측결과와 비교해 볼 때 전반적인 경향은 거의 비슷하게 나타났다. 본 연구에서 제안한 부하의 유형과 보호거리에 따른 SPD의 잔류전압과 부하 단자전압의 특성에 대한 시뮬레이션기법의 타당성은 충분한 것으로 판단된다.

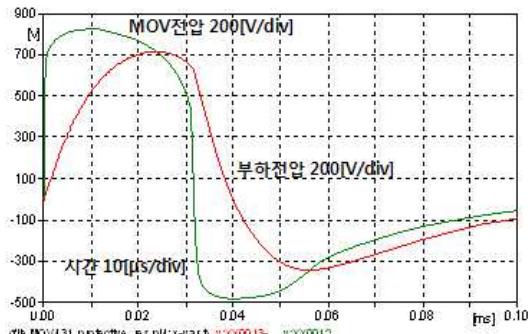
시료로 사용한 SPD의 $V-I$ 곡선의 특성에는 접속선의 영향이 포함되어 있으므로 비선형성이 비교적 낮았으며, MOV소자의 $V-I$ 곡선을 적용하는 경우 접속선의 인덕턴스의 영향을 반영하면 된다. 실제의 SPD 특성을 고려하여 SPD의 설치를 위한 보호성능의 파악 및 설계에 반영하는 실용상 측면에서는 지장이 없는 것으로 보인다.

시뮬레이션결과를 문헌 [8]에 제시된 실측결과와 비교해 보면 본 연구에 적용한 등가회로모델의 요소의 특성이 모두 반영되었음을 알 수 있다. 시뮬레이션결과와 실측결과와의 약간의 차이는 SPD의 $V-I$ 곡선 및 추정된 실험회로에 대한 선로정수의 값이 실제의 값과 다소 차이가 있기 때문인 것으로 보이며, 시뮬레이션기법은 충분히 타당성이 있는 것으로 판단된다.

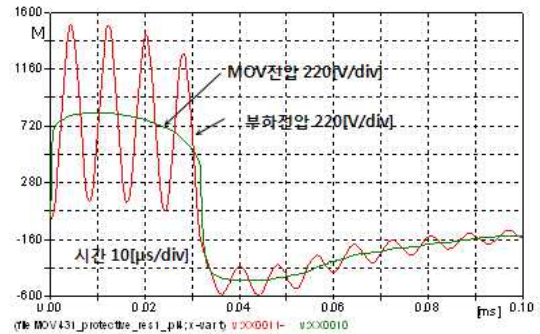
3.2 보호거리에 따른 부하 단자전압

SPD에 10kV, 1.2/50μs 임펄스전압을 인가하였을 때 부하의 유형과 입력임피던스를 파라미터로 하여 보호거리에 따라 나타나는 부하 단자전압에 대한 시뮬레이션결과를 그림 4에 나타내었다. 1.2/50μs 임펄스전압에 대한 SPD의 작동에 따른 부하 단자전압의 보호거리의존성을 산출한 시뮬레이션결과는 문헌 [8]에 제시된 실측결과와 대체적으로 일치하였다. 그림 4(e)에서 입력임피던스가 저항 10Ω과 커패시턴스 17nF의 병렬접속, 그리고 10kΩ과 17nF의 병렬접속인 부하

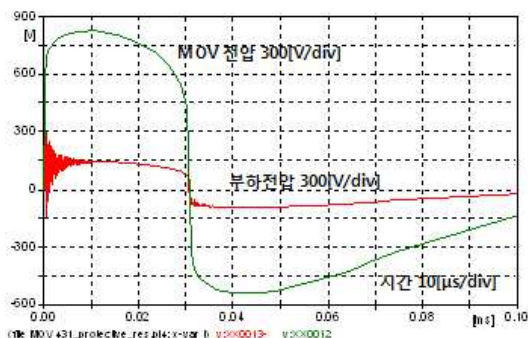
보호거리에 따른 전압제한형 SPD의 보호효과에 대한 시뮬레이션기법



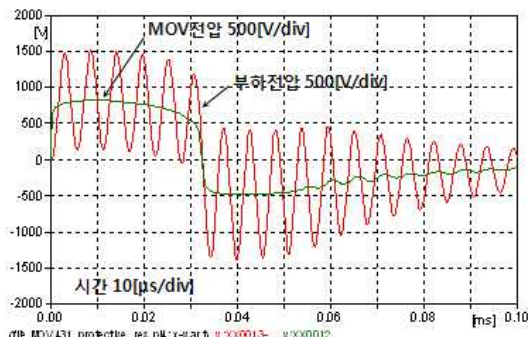
(a) 저항 : 10Ω



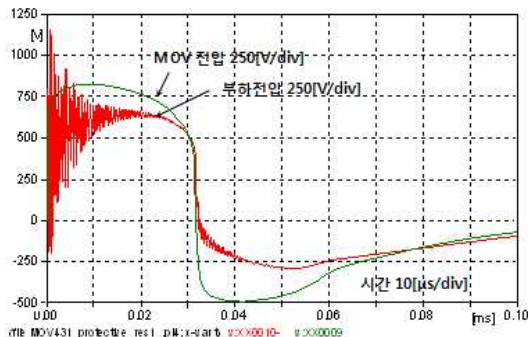
(e) 저항 10kΩ과 커패시턴스 17nF의 병렬회로



(b) 인덕턴스 : 20μH



(c) 커패시턴스 : 8.2nF



(d) 저항 10Ω과 인덕턴스 160μH의 직렬회로

그림 3. 보호거리 50m일 때 SPD의 잔류전압과 부하 단자전압에 대한 시뮬레이션 파형

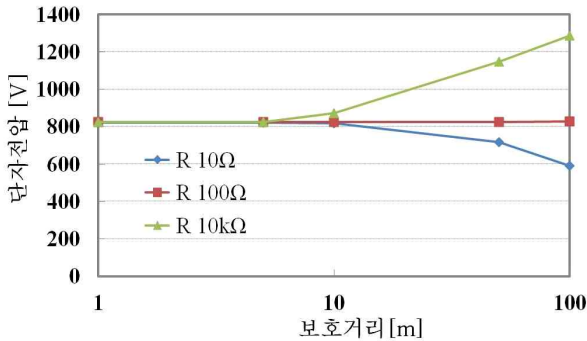
Fig. 3. Simulated waveforms for the residual voltage of SPD and the voltage across the load at the protective distance of 50m

단자전압에 대한 시뮬레이션결과는 커패시터의 영향이 지배적이며 모두 겹쳐져 있다.

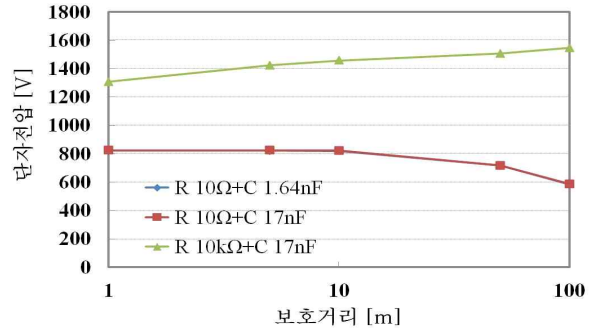
입력임피던스가 10Ω과 100Ω의 저항일 때 부하 단자전압은 거의 비슷하였으나 10kΩ의 경우 부하 단자전압은 보호거리 10m부터 진동현상이 지배적으로 작용하기 때문에 상승하는 것으로 여겨진다. 또한 입력임피던스가 저항과 인덕턴스가 직렬로 접속된 부하의 경우에도 10kΩ의 저항일 때 저항의 영향이 지배적이기 때문인 것으로 분석된다. 또한 저항과 커패시터를 병렬로 접속한 경우 저항 10kΩ일 때는 커패시턴스의 영향이 지배적으로 작용하는 생각된다.

1.2/50μs 임펄스전압이 SPD에 의해 제한된 급상승하는 구형과 전압이 선로를 따라 전파되는 경우 부하 단자전압에 영향을 미치는 원인으로는 선로의 회로정수와 부하 입력임피던스의 상관성 및 진행파의 반사와 투과에 의한 진동현상 2가지로 볼 수 있으며, 이들의 영향은 부하 입력임피던스의 크기와 직접적으로 관련되며, 지배적으로 작용하는 요인에 따라 특징지어진다.

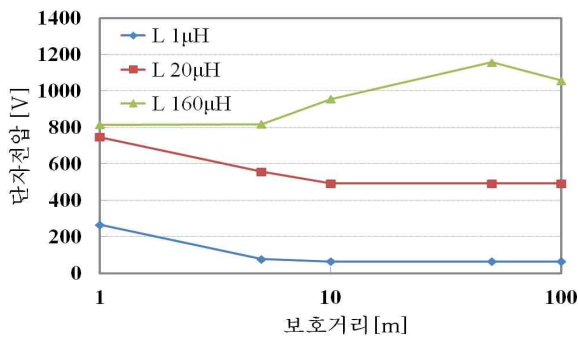
시뮬레이션결과의 전반적인 경향을 보면 임펄스전압에 대한 SPD의 보호성능을 파악하기 위한 시뮬레이션의 등가회로모델은 타당하고 적용한 요소가 적절하였음을 알 수 있다. 그러나 실제회로에 상응하는 정



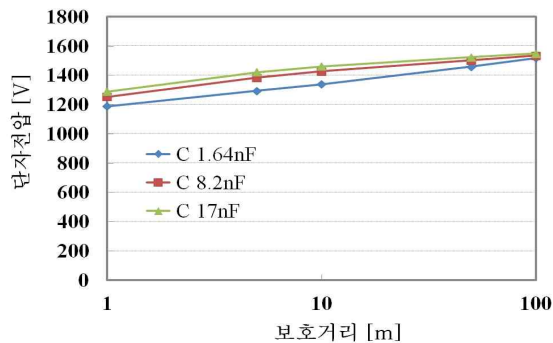
(a) 입력임피던스가 R 인 경우



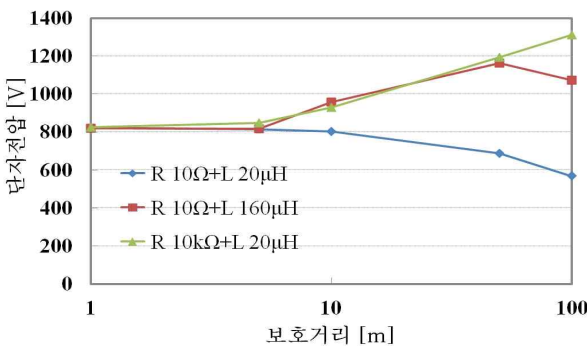
(e) 입력임피던스가 R 과 C 의 병렬접속인 경우



(b) 입력임피던스가 L 인 경우



(c) 입력임피던스가 C 인 경우



(d) 입력임피던스가 R 과 L 의 직렬접속인 경우

그림 4. 보호거리에 따른 부하단자전압의 시뮬레이션결과
Fig. 4. Simulation results of the voltage across the load depending on the protective distance

확한 회로정수의 산출을 위한 모델링의 구현과 SPD의 $V-I$ 곡선을 정확하게 측정하는 것이 필수적 요소임이 밝혀졌으며, 이의 개선을 위한 지속적인 연구가 필요하다.

4. 결론

부하 입력임피던스 및 보호거리에 따른 SPD의 보호성능을 분석하는 시뮬레이션기법의 구현에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

부하 입력임피던스 및 보호거리가 서지전압에 대한 SPD의 보호성능에 미치는 영향을 분석할 수 있는 간이등가회로모델이 제안되었다. 제안된 모델을 적용하여 EMTP프로그램으로 $1.2/50\mu s$ 임펄스전압에 대한 MOV기반 SPD의 보호특성을 해석한 결과는 이미 발표된 실측결과와 비교적 잘 일치하였으며, 제안한 시뮬레이션기법의 우수성이 입증되었다. 본 연구에서 도출된 서지전압에 대한 SPD의 보호성능을 해석하는 시뮬레이션기법은 SPD의 합리적인 설치를 위한 설계에 활용될 것이다.

References

[1] B. H. Lee, D. M. Lee, D. C. Cheong, S. B. Lee, S. C. Lee, "Protection Effects According to the Conditions of

Installations of SPDs for Information-Oriented Equipments”, J. KIEE, Vol.21, No.1, pp.35~41, 2007.

[2] Korea Electric Association; Consumer’s Electrical Installation Guide, pp.569~571, 2010.

[3] KS C IEC 62305-4; Protection against lightning - Part 4: Electrical and electronic systems within structures, pp.83~84, 2007.

[4] KS C IEC 60364-5-53; Electrical installations of buildings -Part 5-53: Selection and erections of electrical equipment-Isolation, switching and control, pp.4~10, 2005.

[5] KS C IEC 61643-12; Low-voltage surge protective devices - Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems- Selection and Application principles, pp.27~38, 2007.

[6] J. He, Z. Yuan, J. Xu, S. Chen, J. Zou, and R Zeng, “Evaluation of the effective protection distance of low-voltage SPD to equipment”, IEEE Tans. Power Delivery., Vol. 20, No. 1, pp.123-130, 2005.

[7] D. Krasowski, T. Kisielewicz, B. Kuca, Z. Flisowski, F. Fiamingo, C. Mazzetti, “On critical distance between an SPD and protected appliance with respect to their voltage coordination”, 30th International Conference on Lightning Protection, pp.1410-1~1410-6, 2010.

[8] B. H. Lee, Y. H. Kim and C. H. Ahn, “Experimental Examination on Protective Effects of SPDs Associated with the Protective Distance and Types of Load”, J. KIEE, Vol.26, No.10, pp.81~88, 2012.

[9] W. H. Hayt, Engineering Electromagnetics, Korean student edition, fifth ed. p.427-444, 1990.

[10] Bok-Hee Lee, Power system engineering, Inha University Publication Department, pp.273~278, 2004.

◆ 저자소개 ◆



이복희 (李福熙)

1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
1988~1989년 동경대학 생산기술연구소
객원연구원. 1999년 Cincinnati대학 방문
교수. 2010~2011년 본 학회 회장. 현재
인하대 IT공대 전기공학부 교수.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



김유하 (金庾河)

1980년 4월 27일생. 2007년 2월 인하대
공대 전기공학과 졸업. 현재 인하대학원
전기공학과 석사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : baal80@daum.net



안창환 (安昌煥)

1959년 11월 4일생. 1983년 원광대학교
공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 인하
대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1999년 8월 인하대학교 대학원 전기
공학과 졸업(박사). 현재 인하공업전문
대학 디지털전자과 교수. 현재 본 학회

총무이사.

Tel : (032)870-2218

Fax : (032)870-2507

E-mail : aza@inhac.ac.kr